

## СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КРЕМНИЯ, ГЕРМАНИЯ И АЛМАЗА ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ В ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Т.А. Гордеева, Б.А. Кульницкий, М.Ю. Попов, Д.А. Овсянников, В.Д. Бланк

Татьяна Андреевна Гордеева \*, Борис Арнольдович Кульницкий, Михаил Юрьевич Попов, Владимир Давыдович Бланк

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

Московский физико-технический институт, Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация, 141701

E-mail: gordeeva.ta@phystech.edu \*

Данила Алексеевич Овсянников

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

E-mail: gordeeva.ta@phystech.edu

*В настоящей работе методами просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения на приборе JEM-2010 исследовали по отдельности структуру порошков германия и кремния после их кратковременной обработки в планетарной мельнице в смеси с частицами алмаза (5-15% по массе). Наноструктурные кремний и германий являются перспективными материалами для термоэлектроники, производства мембран и других применений. Наличие дефектов влияет на особенности их зонной структуры. Структура и свойства кремния и германия зависят от условий обработки. Было установлено, что кроме исходной фазы кремния Si-I и германия Ge-I образцы содержали фазы высокого давления Si-IV и Ge-IV, а также двойники. На поверхности алмазных частиц иногда наблюдали фрагменты, межплоскостные расстояния в которых были равны 0,255 нм, что связано с периодическими разрывами связей в решетке алмаза. Алмазная структура в этих фрагментах оказалась нарушенной, но превращения алмаза в графит не произошло. В литературе есть данные о существовании промежуточной фазы между графитом и алмазом, кристаллическая решетка которой представляет собой периодическое расположение  $sp^2$ - и  $sp^3$ - связей. Эта фаза может быть представлена как слегка деформированная гексагональная решетка, состоящая из трех слоев вдоль оси с. Величина межплоскостного расстояния 0,255 нм соответствует промежуточному расстоянию между  $d_{002}=0,335$  нм для графита и  $d_{111}=0,206$  нм для алмаза. Возникновение промежуточной фазы в поверхностном слое алмаза связано с особенностями обработки алмазных частиц в планетарной мельнице. Отсутствие части межатомных связей у атомов поверхности ведет к образованию специфической кластерной структуры тонкого поверхностного слоя.*

**Ключевые слова:** планетарная мельница, фазовые переходы, кремний, германий, просвечивающая электронная микроскопия

## STRUCTURAL FEATURES OF SILICON, GERMANIUM AND DIAMOND AFTER PROCESSING IN A PLANETARY MILL

T.A. Gordeeva, B.A. Kulnitskiy, M.Yu. Popov, D.A. Ovsyannikov, V.D. Blank

Tatyana A. Gordeeva\*, Boris A. Kulnitskiy, Mikhail Yu. Popov, Vladimir D. Blank

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Institutskiy Per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

E-mail: gordeeva.ta@phystech.edu \*

Danila A. Ovsyannikov

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

E-mail: gordeeva.ta@phystech.edu

*In this work, the structure of germanium and silicon powders after their short-term processing in a planetary mill in a mixture with diamond particles (5-15% by weight) was studied separately using high-resolution transmission electron microscopy on the JEM-2010 device. Nanostructured silicon and germanium are promising materials for thermoelectronics, membrane manufacturing and other applications. The presence of defects affects the features of their zone structure. The structure and properties of silicon and germanium depend on the processing conditions. It was found that in addition to the initial silicon phase Si-I and germanium Ge-I, the samples contained high-pressure phases Si-IV and Ge-IV, as well as twins. Fragments with interplanar distances of 0.255 nm were sometimes observed on the surface of diamond particles, which is associated with periodic bond breaks in the diamond lattice. The diamond structure in these fragments turned out to be broken, but the transformation of diamond into graphite did not occur. In the literature, there is evidence of the existence of an intermediate phase between graphite and diamond, the crystal lattice of which is a periodic arrangement of  $sp^2$ - and  $sp^3$ -bonds. This phase can be represented as a slightly deformed hexagonal lattice consisting of three layers along the c axis. The value of the interplanar distance of 0.255 nm corresponds to the intermediate distance between  $d_{002}=0.335$  nm for graphite and  $d_{111}=0.206$  nm for diamond. The appearance of an intermediate phase in the surface layer of diamond is associated with the peculiarities of processing diamond particles in a planetary mill. The absence of part of the interatomic bonds in the atoms of the surface leads to the formation of a specific cluster structure of a thin surface layer.*

**Key words:** planetary mill, phase transformations, silicon, germanium, transmission electron microscopy

**Для цитирования:**

Гордеева Т.А., Кульницкий Б.А., Попов М.Ю., Овсянников Д.А., Бланк В.Д. Структурные особенности кремния, германия и алмаза после обработки в планетарной мельнице. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 12. С. 60–65

**For citation:**

Gordeeva T.A., Kulnitskiy B.A., Popov M.Yu., Ovsyannikov D.A., Blank V.D. Structural features of silicon, germanium and diamond after processing in a planetary mill. *ChemChemTech [Изв. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 12. P. 60–65

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение свойств кремния и германия представляет большой интерес благодаря их уникальным физико-химическим свойствам. Сегодня это – основные материалы для электроники. Они встречаются в фоточувствительных приборах, фотодиодах и фототранзисторах, сенсорных устройствах, интегральных схемах. Важную роль кремний играет в солнечной энергетике. Большой интерес представляют гексагональные фазы и полиморфы кремния и германия, поскольку обладают способностью обеспечивать более эффективную люминесценцию по сравнению с алмазоподобными кубическими фазами [1-3]. Структура и свойства кремния и германия зависят от условий их деформирования. Наличие дефектов в кристаллической решетке влияет как на механические свойства материала, так и на особенности его зонной структуры [4].

В настоящее время обработка в планетарной мельнице является популярным методом получения нанопорошка с помощью механического воздействия, поскольку этот метод не требует дорогостоящего оборудования и может применяться для обработки большого объема материала [5]. Высокая механическая нагрузка, которую испытывают частицы порошка в процессе измельчения, приводит к фазовым превращениям [6]. Целью настоящей работы было исследование структуры кремния и германия после кратковременной (30 мин) обработки в планетарной шаровой мельнице в присутствии порошка алмаза методами просвечивающей электронной микроскопии.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе порошкообразная смесь кремния и алмаза; кремния и германия (1:4 по массе) со средним размером зерна 10 нм была по-

лучена в результате обработки в планетарной мельнице Fritsch Planetary Micro Mill PULVERISETTE 7 Premium Line со стальным барабаном и со стальными шарами. Длительность обработки составляла 30 мин, цикл обработки состоял из 1 мин измельчения и 3 мин охлаждения. Максимальная температура образца при таком цикле обработки в планетарной мельнице не превышала 420 К, что было показано в [7]. Следы пластической деформации не были обнаружены на стальных шарах при работе мельницы без образца, поэтому можно считать, что контактное давление при ударе шаров не превышало их твердости - 6 ГПа [8]. При циклическом нагружении пластическая деформация и фазовые превращения возможны даже при сравнительно небольших скоростях соударения [6, 9], поскольку накапливающиеся дефекты в кристаллической решетке создают благоприятные условия для образования новых фаз. Порошки, полученные после измельчения в мельнице, исследовали методами электронной микроскопии высокого разрешения с использованием электронного микроскопа JEOL JEM-2010 TEM.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При нормальных условиях кремний и германий представляют собой полупроводники со структурой алмаза с параметрами решетки  $a = 0,543$  нм для Si-I и  $a = 0,566$  нм для Ge-I [10]. Под давлением в этих материалах образуется множество фаз. Наиболее часто встречаются фазы высокого давления: Si-III (Ge-III) и Si-IV (Ge-IV), что наблюдалось в [11] при более длительном измельчении в планетарной мельнице. Гексагональная фаза кремния Si-IV (лонсдейлит) имеет параметры  $a = 0,386$  нм,  $c = 0,631$  нм, в то время как аналогичная фаза Ge-IV имеет параметры  $a = 0,394$  нм и  $c = 0,655$  нм.

ПЭМ исследования показали, что обработка в планетарной мельнице приводит к измельчению, образованию многочисленных дефектов, полиморфов и фаз высокого давления.

На рис. 1 стрелками показаны двойники по плоскости  $\{111\}$  в частицах кремния (а) и германия (б). О том, что это двойники, свидетельствуют симметричные ориентировки фрагментов кристалла по обе стороны от границ. Видно, что эти фрагменты находятся в зеркальном отражении. Обычная двойниковая граница традиционно обозначается, как  $\Sigma = 3$ . Подобные границы часто встречаются в естественных и в искусственных алмазах [12] и в других материалах с решеткой алмаза [6, 13, 14].

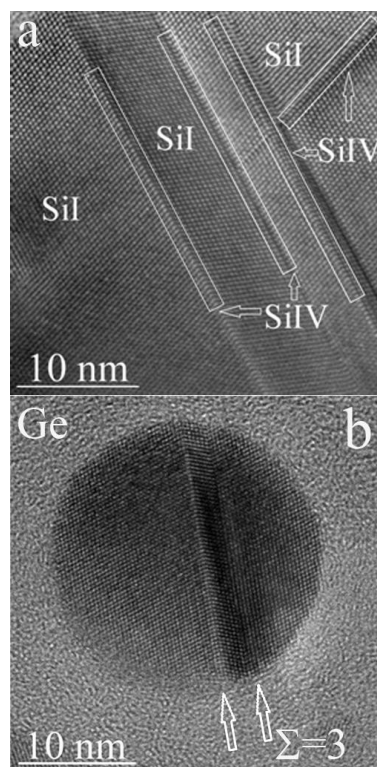


Рис. 1. Двойникование в Si и Ge после размолла в планетарной мельнице: а) Фрагменты Si-IV в Si-I. Прямоугольниками обозначены фрагменты Si-IV; на двойниковой границе происходит нарушение упаковки ABCABC. Возникает упаковка АВА, что характеризует гексагональную структуру Si-IV; б) Двойники в германии: стрелками обозначены границы ( $\Sigma=3$ )  
Fig. 1. Twinning in Si and Ge after grinding in a planetary mill: а) Si-IV fragments in Si-I. Rectangles indicate fragments of Si-IV; ABCABC packing violation occurs on the double border. There is an ABA packing, which characterizes the hexagonal structure of Si-IV; б) Twins in Ge: the arrows indicate the boundaries ( $\Sigma=3$ )

Двойникование в кремнии наблюдалось ранее в слоях кремния, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [15], при деформации кремния методом склерометрии [16], при наноиндентировании [17]. В работе [18] механическое двойникование наблюдалось при вдавливании в образцы алмазного индентора при повышенных температурах в вакууме. Механическое двойникование наблюдалось у германия в интервале температур 300-600 °С, у кремния – в интервале 500-900 °С. Считается, что зарождение двойников не является термоактивируемым процессом, а происходит в местах с высокой концентрацией напряжений [19]. Известно, что переход к двойникованию обусловлен высокой силой Пайерлса, необходимой для перемещения дислокаций в плоскости атомов в элементарной ячейке. Вследствие этого в кристаллах кремния и германия наблюдается резкий рост предела текучести и твердости при снижении температуры.

На рис. 1 а,б присутствуют слои гексагональной структуры – лонсдейлита (Si-IV и Ge-IV), имеющие традиционное происхождение, образованные внутри структуры Si-I и Ge-I, соответственно. Кристаллическая алмазная решетка может быть описана последовательностью ABCABC, тогда как последовательность слоев в Si-IV и Ge-IV – ABAB.

При исследовании фазовых превращений в Si под давлением в широком диапазоне температур были обнаружены 11 различных фаз, в том числе ряд метастабильных при нормальных условиях [20-22].

Деформация кремния и германия при обработке в планетарной мельнице во многом напоминает процессы, происходящие при нагружении, индентировании, царапании или механической обработке [23]. Однако частицы подвергаются различной обработке, и поэтому на разных стадиях можно увидеть большое количество дефектов и фаз. По нашим оценкам, в условиях эксперимента механические напряжения, возникающие при обработке в планетарной мельнице, не превышали 6 ГПа, а температура не превышала 420 К. Теоретическое предельное сдвиговое напряжение кремния и германия, рассчитанное из первых принципов, достигает 6,5 ГПа и 4,5 ГПа соответственно [24-25].

Напряжения Пайерлса (необходимые для перемещения дислокаций в плоскости атомов в элементарной ячейке) в Si и Ge выше, чем теоретическая прочность на сдвиг. Нестабильность решетки наблюдается раньше, чем проявляется дислокационная пластичность, это может приводить к фазовым переходам, которые можно рассматривать как механизм пластической деформации. Рассчитанные по дислокационной модели Пайерлса – Набарро напряжения Пайерлса равны 7 ГПа для кремния и 6 ГПа для германия [26]. Эти значения подтверждается экспериментально: при индентировании вместо развития пластической деформации решетка становится неустойчивой, и в этих материалах наблюдаются фазовые переходы [27]. Однако оценка предела текучести по значению твердости составляет для кремния 4 ГПа, для германия 3 ГПа, что значительно ниже рассчитанных значений. По модели Френкеля, выбранной в качестве критерия оценки предела упрочнения материала, предельное сдвиговое напряжение для кремния равно 5,8 ГПа, для германия – 4,7 ГПа.

На рис. 2 показана частица алмаза, содержащая фрагмент кристаллической решетки с межплоскостным расстоянием 0,255 нм. Алмазная структура

в этом фрагменте оказалась нарушенной, но превращения алмаза в графит не произошло. Появились плоскости с межплоскостным расстоянием 0,255 нм, которые составляют с плоскостями (002) алмаза угол в  $8^\circ$ . Таким образом, рис. 2 показывает превращение алмаза не в графит, а в некую другую структуру. В [28] было показано существование промежуточной фазы между графитом и алмазом, кристаллическая решетка которой представляет собой периодическое расположение  $sp^2$ - и  $sp^3$ -связей. Она была обнаружена после термобарической обработки фуллерена  $C_{70}$ . Подобная структура была получена в [29] после облучения кристалла алмаза нейтронным пучком. Такая структура может образоваться в результате частичного разрыва  $sp^3$ -связей. Другими словами, в процессе превращения плоскости (111) алмаза в плоскость (001) графита или наоборот образуется промежуточная структура. Как было показано, такая структура представляет собой триклинную решетку с параметрами  $a = b = 0,51$  нм,  $c = 0,745$  нм,  $\alpha = \beta = 82^\circ$ . Ее кристаллическая решетка может быть представлена как слегка деформированная гексагональная решетка, состоящая из трех слоев вдоль оси  $c$ . Было предположено, что таких структур может быть несколько. Так, кристаллические решетки некоторых карбинов могут иметь подобную конструкцию. Величина межплоскостного расстояния  $c$  в подобных решетках может быть кратна величине 0,24-0,25 нм. Такая структура является нестабильной. Так, наблюдали превращение ее в графит под воздействием электронного пучка в колонне микроскопа [29]. Величина межплоскостного расстояния 0,255 нм находится довольно близко к величине 0,24-0,25 нм [28] и соответствует промежуточному расстоянию между  $d_{002} = 0,335$  нм для графита и  $d_{111} = 0,206$  нм для алмаза. По-видимому, при прохождении упругой волны через частицу алмаза как в процессе нагрева, так и в процессе деформации могут происходить аналогичные процессы. Количество потенциально разрывающихся связей в решетке алмаза зависит от величины вводимой энергии и от величины ее локальных флуктуаций. Поэтому степень деструкции может колебаться от возникновения дефектов решетки в виде отдельных разорванных связей до полного разделения целого кристалла на отдельные фрагменты [30].

Разрыв  $sp^3$ -связей между (111) плоскостями алмаза не сопровождается симметричным расположением оставшихся  $sp^3$ -связей по обе стороны плоскости, что приводит к искривлению и появлению угла разориентировки.

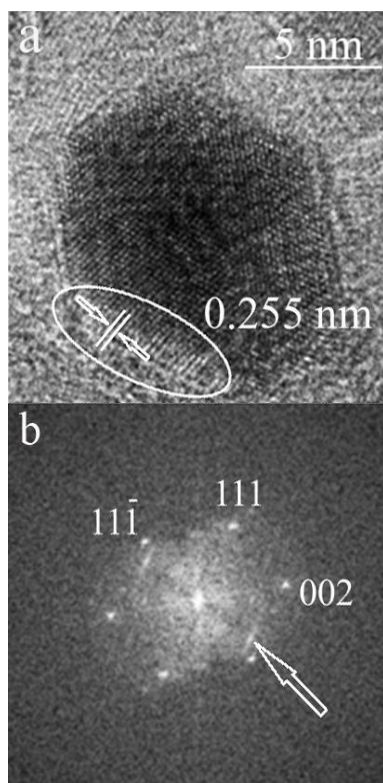


Рис. 2. Частица алмаза, один из краев которой представляет собой набор плоскостей с межплоскостным расстоянием 0,255 нм: а) Овалом выделены плоскости с межплоскостным расстоянием 0,255 нм б) Быстрое Фурье преобразование от а). Стрелкой показан рефлекс, соответствующий показанным плоскостям. Угол разориентировки с плоскостями (111) равен 8°  
 Fig. 2. A diamond particle, one of the edges of which is a fragment with fringes with an interplanar distance of 0.255 nm: a) Oval planes with interplanar distances of 0.255 nm are highlighted b) FFT image from a). The arrow shows the reflex corresponding to the planes shown. The disorientation angle with the planes (111) is 8°

В нагруженном твердом теле его поверхностный слой рассматривается как особое состояние вещества. Отсутствие у атомов поверхности половины межатомных связей и большого числа структурных вакансий обуславливает специфическую кластерную структуру тонкого поверхностного слоя. Как следствие, поверхностный слой при нагружении тела более интенсивно теряет подвижную устойчивость по сравнению с объемом кристалла и проявляет специфические механизмы пластического течения [31].

#### ВЫВОДЫ

Методами электронной микроскопии были исследованы порошки кремния и германия, обработанные в планетарной мельнице в смеси с порошком алмаза. Показано, что в результате деформации в кремнии и германии образуются двойники и фазы высокого давления Si-IV и Ge-IV. На краю

алмазных частиц обнаружены фрагменты, межплоскостные расстояния в которых равны 0,255 нм, что связано с периодическими разрывами связей в решетке алмаза.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП в ФГБНУ ТИСУМ (электронный микроскоп JEOL JEM 2010, планетарная мельница Planetary Micro Mill PULVERISETTE 7 Premium Line).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The work was performed using the equipment of the Center for Collective Use at FGBNU TISNUM (electron microscope JEOL JEM 2010, planetary mill Planetary Micro Mill PULVERISETTE 7 Premium Line).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

#### ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. **Bandet J., Despax B., Caumont M.** Vibrational and electronic properties of stabilized wurtzite-like silicon. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2002. V. 35. N 3. P. 234-239. DOI: 10.1088/0022-3727/35/3/311.
2. **Raffy C., Furthmüller J., Bechstedt F.** Properties of hexagonal polytypes of group-IV elements from first-principles calculations. *Phys. Rev. B.* 2002. V. 66. P. 75201. DOI: 10.1103/PhysRevB.66.075201.
3. **Rödl C., Sander T., Bechstedt F., Vidal J., Olsson P., Laribi S., Guillemoles J.-F.** Wurtzite silicon as a potential absorber in photovoltaics: Tailoring the optical absorption by applying strain. *Phys. Rev. B.* 2015. V. 92. P. 45207. DOI: 10.1103/PhysRevB.92.045207.
4. **Ovsyannikov D.A., Popov M.Y., Buga S.G., Kirichenko A.N., Tarelkin S.A., Aksenov V.V., Tat'yanin E.V., Blank V.D.** Transport properties of nanocomposite thermoelectric materials based on Si and Ge. *Phys. Solid State.* 2015. V. 57. P. 605-611. DOI: 10.1134/S1063783415030208.
5. **Koch C.C.** Structural nanocrystalline materials: an overview. *J. Mater. Sci.* 2007. V. 42. N 5. P. 1403-1414. DOI: 10.1007/s10853-006-0609-3.
6. **Kulnitskiy B., Annenkov M., Perezhugin I., Popov M., Ovsyannikov D., Blank V.** Mutual transformation between crystalline phases in silicon after treatment in a planetary mill: HRTEM studies. *Acta Crystallogr. Sect. B Struct. Sci. Cryst. Eng. Mater.* 2016. V. 72. P. 733-737. DOI: 10.1107/S2052520616011422.
7. **Kwon Y.-S., Gerasimov K.B., Yoon S.-K.** Ball temperatures during mechanical alloying in planetary mills. *J. Alloys Compd.* 2002. V. 346. N 1-2. P. 276-281. DOI: 10.1016/S0925-8388(02)00512-1.
8. **El-Eskandarany M.S.** Mechanical alloying: For fabrication of advanced engineering materials. NY: Noyes Publications. 2013. 242 p.
9. **Курлов А.С., Гусев А.И.** Модель размола порошков. *Журн. техн. физики.* 2011. Т. 81. Вып. 7. С. 76-82. DOI: 10.1134/S1063784211070152.

- Kurlov A.S., Gusev A.I.** Model for Milling of Powders. *Techn. Phys.* 2011. V. 56. N 7. P. 975-980. DOI: 10.1134/S1063784211070152.
10. **Тонков Е.Ю.** Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении М.: Наука. 1979. 192 с.  
**Tonkov E.Yu.** Phase Transformations of Elements under High Pressure. M.: Nauka. 1979. 192 p. (in Russian).
  11. **Кульницкий Б.А., Гордеева Т.А., Овсянников Д.А., Попов М.Ю., Бланк В.Д.** Фазовые превращения элементов IV группы: углерод, кремний, германий при воздействии циклических напряжений до 6 ГПа. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 12. С. 10-15. DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.8y.  
**Kulnitskiy B.A., Gordeeva T.A., Ovsyannikov D.A., Popov M.Yu., Blank V.D.** Phase transformations of group IV elements: carbon, silicon, germanium after treatment under cyclic stresses up to 6 GPa. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 12. P. 10-15 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.8y.
  12. **Kulnitskiy B., Perezhogin I., Dubitsky G., Blank V.** Polytypes and twins in the diamond–lonsdaleite system formed by high-pressure and high-temperature treatment of graphite. *Acta Crystallogr. Sect. B Struct. Sci. Cryst. Eng. Mater.* 2013. V. 69. P. 474-479. DOI: 10.1107/S2052519213021234.
  13. **Гордеева Т.А., Овсянников Д.А., Попов М.Ю., Кульницкий Б.А., Бланк В.Д.** Особенности структуры германия, обработанного в планетарной мельнице. *ФТТ.* 2020. Т. 62. Вып. 10. С. 1597-1600. DOI: 10.21883/FTT.2020.10.49902.080.  
**Gordeeva T.A., Ovsyannikov D.A., Popov M.Yu., Kulnitskiy B.A., Blank V.D.** Structure of Germanium Treated in a Planetary Mill. *Phys. Solid State.* 2020. V. 62. N 10. P. 1765–1768. DOI: 10.1134/S106378342010008X.
  14. **Kulnitskiy B.A., Perezhogin I.A., Popov M.Yu., Ovsyannikov D.A., Blank V.D.** Peculiarities of the Twinning in Silicon during Ball Milling in the Presence of Two Different Materials. *Symmetry.* 2018. V. 10. P. 200. DOI: 10.3390/sym10060200.
  15. **Fissel A., Bugiel E., Wang C.R., Osten H.J.** Formation of twinning-superlattice regions by artificial stacking of Si layers. *J. Cryst. Growth.* 2006. V. 290. N 1. P. 392-397. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2006.02.009.
  16. **Mylvaganam K., Zhang L.C.** Nanotwinning in monocrystalline silicon upon nanoscratching. *Scr. Mater.* 2011. V. 65. P. 214-216. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2011.04.012.
  17. **Ruffell S., Bradby J.E., Williams J.S.** Formation and growth of nanoindentation-induced high pressure phases in crystalline and amorphous silicon. *J. Appl. Phys.* 2007. V. 102. N 6. P. 063521. DOI: 10.1063/1.2781394.
  18. **Zhu Y.T., Liao X.Z., Wu X.L.** Deformation twinning in nanocrystalline materials. *Prog. Mater. Sci.* 2012. V. 7. N 1. P. 1-62. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2011.05.001.
  19. **Lifshitz Y., Duan X.F., Shang N., Li Q., Wan L., Bello I., Lee T.** Epitaxial diamond polytypes on silicon. *Nature.* 2001. V. 412. N 6845. P. 404. DOI: 10.1038/35086656.
  20. **George A.** High pressure phase of c-Si. In: Properties of Crystalline Silicon IET № 20. Ed by R. Hull. L.: INSPEC. 1999. Ch. 3. P. 104-107.
  21. **Domnich V., Gogotsi Y.** Phase transformation in silicon under contact loading. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2002. V. 3. P. 1-36.
  22. **Piltz R.O., Maclean J.R., Clark S.J., Ackland G.J., Hatton P.D., Crain J.** Structure and properties of silicon XII: A complex tetrahedrally bonded phase. *Phys. Rev. B.* 1995. V. 52. N 6. P. 4072-4085. DOI: 10.1103/physrevb.52.4072.
  23. **Christian J.W., Mahajan S.** Deformation twinning. *Prog. Mater. Sci.* 1995. V. 39. P. 1-157. DOI: 10.1016/0079-6425(94)00007-7.
  24. **Ogata S., Li J., Hirosaki N., Shibutani Y., Yip S.** Ideal shear strain of metals and ceramics. *Phys. Rev. B.* 2004. V. 70. P. 104104. DOI: 10.1103/PhysRevB.70.104104.
  25. **Gogotsi Y.G., Domnich V., Dub S.N., Kailer A., Nickel K.G.** Cyclic nanoindentation and Raman microspectroscopy study of phase transformations in semiconductors. *J. Mater. Res.* 2000. V. 15. N 4. P. 871-879. DOI: 10.1557/JMR.2000.0124.
  26. **Sirdeshmukh D. B., Sirdeshmukh L., Subhadra K. G.** Micro- and macro-properties of solids: Thermal, Mechanical and Dielectric Properties. *Springer Ser. in Mater. Sci.* 2006. 80. P. 414. DOI: 10.1007/3-540-31786-4.
  27. **Sumiya H., Irifune T.** Indentation hardness of nano-poly-crystalline diamond prepared from graphite by direct conversion. *Diam. Relat. Mater.* 2004. V. 13. N 10. P. 1771–1776. DOI: 10.1016/j.diamond.2004.03.002.
  28. **Blank V.D., Kulnitskiy B.A., Tatyannin Ye.V., Zhigalina O.M.** A new phase of carbon. *Carbon.* 1999. V. 37. P. 549-554. DOI: 10.1016/S0008-6223(98)00220-6.
  29. **Blank V.D., Kulnitskiy B.A., Zhigalina O.M.** Direct phase transformation of the intermediate carbon phase (ICP) into graphite under electron-beam irradiation. *Superhard Mater.* 2002. V. 4. P. 1-7.
  30. **Andreev V.D.** Spontaneous graphitization and thermal disintegration of diamond at T>2000 K. *Phys. Solid State.* 1999. V. 41. N 4. P. 627-632. DOI: 10.1134/1.1130812.
  31. **Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В., Моисеенко Д.Д.** Природа локализации пластической деформации твердых тел. *Журн. техн. физики.* 2007. Т. 77. Вып. 8. С. 62-70.  
**Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V., Moiseenko D.D.** The nature of localization of plastic deformation of solids. *Zhurn. Tekhn. Fiz.* 2007. V. 77. N 8. P. 62-70 (in Russian).

Поступила в редакцию 04.10.2021

Принята к опубликованию 11.10.2021

Received 04.10.2021

Accepted 11.10.2021